


Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОТАПОВА МАР'ЯНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 662.659:606:628:543.2:543.5:004.942

**ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ БІОГАЗУ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ
ПІСЛЯСПИРТОВОЇ ЗЕРНОВОЇ БАРДИ**

03.00.20 – біотехнологія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник, доцент **Голуб Наталія Борисівна**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри екобіотехнології та біоенергетики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Циганков Сергій Петрович**, ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», заступник директора з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор **Баль-Прилипко Лариса Вацлавівна**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, декан факультету харчових технологій та управління якістю продукції АПК.

Захист відбудеться 29 травня 2019 р о 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр.. Перемоги, 37, корп.4, ауд. 258.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «26» квітня 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради



Галкін О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На фоні масштабного споживання первинних енергоресурсів в Україні при незначному на теперішній час внеску відновлюваних джерел енергії (1,6%) розвиток біогазових технологій є актуальним та перспективним. Одними з найбільш привабливих для використання біогазових установок з точки зору екологічної та економічної доцільності є підприємства спиртової промисловості.

Післяспиртова барда (ПСБ), об'єм якої утворюється в 10-15 разів більше ніж виробленої продукції, характеризується високим вмістом органічних речовин (за хімічним споживанням кисню (ХСК) до 40-120 г $O_2/дм^3$), швидким прокисанням, що призводить до екологічної загрози довкіллю у випадку її розміщення на полях фільтрації.

На сьогодні використовують такі технології переробки барди: з випарними станціями; аеробною або анаеробною мікробіологічною переробкою рідкої фази; з отриманням кормових дріжджів та комбіновані.

За рахунок високого показника органічних забруднень та агресивності середовища, існуючі технології анаеробної переробки барди включають в себе методи попередньої підготовки сировини: розведення (мелясна барда – мінімум в 5 разів, зернова – в 3-4 рази); розділення твердої та рідкої фаз (для анаеробного зброджування використовується тільки рідка фаза); попередня ацидифікація. Дані етапи підготовки барди до зброджування значно підвищують собівартість біогазу та не забезпечують переробку відходів у повному обсязі. Відповідно, це впливає на кількість отриманого біогазу, оскільки не використовується весь енергетичний потенціал сировини.

Основними проблемами, що виникають при переробці ПСБ з одержанням біогазу, є низьке значення рН – до 3,7, нестача біогенних елементів та невідповідність співвідношення елементів живлення, необхідного для перебігу процесу метаногенезу (C:N:P (75-125):5:1 [Едер Б., 2011]. Для вирішення таких проблем використовують хімічні речовини.

Виходячи з Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, за якою частка ВДЕ має становити 11% у 2020 році та необхідності утилізації ПСБ, розробка технології одержання біогазу при очищенні стічних вод спиртзаводу, яка дасть змогу повної утилізації ПСБ без застосування хімічних речовин, є актуальною проблемою, яка вирішує як енергетичні, так і екологічні проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки «Рациональне природокористування» та стратегічним пріоритетним напрямам інноваційної діяльності в Україні на 2009-2020 роки: «Вдосконалення хімічних технологій, нові матеріали, розвиток біотехнологій»; «Охорона і оздоровлення людини та навколишнього середовища».

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами: «Дослідження процесів біодеструкції органічних відходів різноманітного походження для

захисту довкілля на станції «Академік Вернадський», № ДР 0113U005685 (2013 р.), виконавець; «Фотобіоелектрохімічна конверсія відходів і біосировини з одержанням електричної енергії та енергоносіїв», № ДР 0113U001650 (2013-2014 рр.), виконавець. «Отримання енергоносіїв з відходів виробництва біодизельного палива, промислових стоків, мікроводорості *Chlorella vulgaris* та відходів її культивування», № ДР 0115U000399 (2015-2016 рр.), виконавець; «Використання потенціалу гідробіонтів для конверсії біосировини та забруднень стічних вод», № ДР 0117U002389 (2017-2018 рр.), виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка технології одержання біогазу при утилізації післяспиртової зернової барди.

Для реалізації поставленої мети вирішували наступні **задачі**:

- визначити раціональне співвідношення косубстратів післяспиртова барда/послід для процесу ферментації барди;
- встановити раціональне співвідношення інокуляту до субстрату для отримання максимального виходу біогазу та вмісту метану в ньому;
- дослідити процес утворення гранул з асоціації мікроорганізмів за використання різних матеріалів як центрів грануляції для інтенсифікації процесу метаногенезу;
- змодельовати процес отримання біогазу в процесі утилізації барди, залежно від зміни рН середовища та об'єму субстрату, що замінюється;
- обґрунтувати та розробити технологічну та апаратурну схеми процесу конверсії відходів спиртового виробництва в енергоносіїв.

Об'єкт дослідження. Процес конверсії відходів спиртового виробництва (післяспиртової зернової барди та виробничої стічної води) з одержанням біогазу.

Предмет дослідження. Раціональні параметри процесу отримання біогазу при утилізації відходів спиртових виробництв, які працюють на зерновій сировині.

Методи дослідження. Для визначення якісного складу біогазу використовували метод газової хроматографії. Для визначення таких показників як рН, ХСК, біологічне споживання кисню (БСК) стічної води та післяспиртової барди використовували хімічні та електрохімічні методи аналізу. Для визначення кількості сухої органічної речовини, зольності застосовували гравіметричний метод. Для визначення летких жирних кислот (ЛЖК) – рідинну хроматографію. Обробку результатів досліджень та графічне оформлення даних здійснено за допомогою програмного забезпечення MS Excel, АС КОМПАС.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше встановлено вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при коферментації барди та посліду птахів, що створює умови для саморегуляції рН середовища в процесі метаногенезу, і підвищує вихід біогазу (метану);
- вперше виявлено залежність виходу біогазу від об'ємної частки субстрату, яка заміщується на барду і не впливає на параметри процесу продукування метану, що дозволяє проводити процес з максимальною ефективністю;

- встановлено умови (рН, термін перебування субстрату в реакторі, співвідношення С : N), за яких можливо проводити процес в неперервному режимі, заміщуючи частину субстрату на сиру барду зі збереженням раціонального виходу біогазу;

- вперше розроблено математичну модель виходу біогазу залежно від значення рН та об'єму заміщення частини субстрату на сиру ПСБ, яка є підґрунтям для створення системи управління процесом ферментації післяспиртової барди.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вирішенні важливої проблеми утилізації післяспиртової зернової барди з одержанням біогазу. Одержано такі практичні результати:

- розроблена двостадійна технологія утилізації післяспиртової зернової барди дозволяє знизити енергетичні витрати, отримати біогаз та добриво;

- визначені параметри процесу дозволяють підвищити ефективність утилізації післяспиртової барди та підвищити вихід біогазу та вміст метану в ньому (Акт впровадження у проектну документацію ТОВ «Про-Енерджі» від 23.05.2018 р.);

- використання посліду птахів як косубстрату дозволяє виключити використання хімічних речовин для регуляції рН процесу та елементів живлення.

Результати проведених досліджень впроваджено у навчальний процес підготовки фахівців за спеціальністю 162 Біотехнологія та біоінженерія (Акт впровадження від 20.06.2018 р.)

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи одержано здобувачем особисто. Внесок дисертанта включає: розробку та конструювання лабораторної установки, яка дозволяє регулювати масообмінні процеси, температуру, збір біогазу; проведення коферментації післяспиртової барди та посліду, а також визначення раціональних параметрів даного процесу; створення апаратурної та технологічної схем отримання біогазу з відходів спиртового виробництва. Концепцію роботи, планування, обговорення результатів та висновків проведено спільно з керівником. Математичну модель ферментативного процесу коферментації післяспиртової барди розроблено разом з к.т.н. Карпенко Ю.В.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації були представлені на щорічних конференціях: «Біотехнологія ХХІ століття», м. Київ, 2011 (26 квітня); м. Київ, 2015 (24 квітня); «Екологія Людина Суспільство», м. Київ, 2011 (18–22 травня); м. Київ, 2012 (26 – 30 вересня); XII міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика ХХІ століття», Крим, 2012 (10 - 14 вересня); V Міжнародна науково-практична конференція «Чиста вода. Фундаментальні прикладні та промислові аспекти», м. Київ, 2017 (26–27 жовтня); «Міжнародна конференція ЕТЕВК–2011», Ялта, 2011 (6-10 червня); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті» м. Київ, 2015 (28-29 травня); 2018 (26-28 вересня); IX Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» м. Львів 2017 (6-7 квітня); VII Міжнародній

науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)», м. Київ, 2018, (23-27 травня); Сімнадцята Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання)», м. Львів 2018 (24-25 травня).

Публікації за результатами дисертаційної роботи. За темою дисертації опубліковано 21 наукову працю, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях (1 з яких у іноземному виданні та 3 у виданнях України, що входять до наукометричних баз даних), 1 стаття в іншому виданні, 13 тез у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основоного тексту дисертації складає 129 сторінок друкованого тексту, містить 28 рисунків, 17 таблиць, 164 найменувань літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, відомості про апробацію результатів роботи.

В першому розділі «Аналіз сучасного стану та ефективності біологічної переробки зернової післяспиртової барди» зроблено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертації. Наведено та розглянуто існуючі методи переробки та утилізації післяспиртової зернової барди, зроблено їх порівняльний аналіз. Особливу увагу надано біологічним методам переробки ПСБ. Спираючись на літературні дані, зроблено висновок, що найбільш перспективними методами переробки ПСБ є отримання білоквмісної кормової добавки та біогазу.

Також у даному розділі розглянуто фізичні та хімічні чинники, які впливають на процес метаноутворення: температура; кислотність середовища; співвідношення С : N; термін перебування субстрату в реакторі; навантаження по органічній речовині; вологість субстрату; інгібітори.

В дослідженнях [Андросов А., 2010; Кузнецов І., 2012; Carrilho E., 2016] показано, що анаеробне зброджування ПСБ в сирому вигляді неможливе внаслідок високої кислотності середовища, нестачі біогенних елементів тощо. Тому використовують попередню підготовку сировини, яка зводиться, в основному, до розділення твердої і рідкої фаз з подальшою утилізацією рідкої фази в ферментативному процесі.

Ще одним методом є коферментація. Встановлено, що за рахунок введення в середовище косубстрату можна коригувати концентрацію йонів водню, вологість та співвідношення С : N субстрату. Оптимальне співвідношення С : N для анаеробної ферментації ПСБ становить 30 : 1 [Едер Б., 2011]. В літературних джерелах, в основному, наведено дослідження анаеробної переробки барди з використанням коров'ячого гною в якості косубстрату з суперечливими даними щодо раціонального співвідношення ПСБ : косубстрат,

введення додаткових хімічних речовин тощо для одержання максимального виходу біогазу та вмісту метану в ньому.

На основі аналізу літературних джерел сформульовано завдання дисертаційної роботи.

В другому розділі «Матеріали та методи досліджень» наведено методи та методики досліджень, а також обладнання для їх здійснення, якісний та кількісний склад сировини, характеристики біологічного об'єкта метанового зброджування – ПСБ та посліду. Наведено фото та схему лабораторної установки та описано принцип її роботи. Запропонована лабораторна установка дозволяє встановлювати необхідний температурний режим зброджування, швидкість перемішування. За рахунок приєднаного газгольдера мокрого типу можливо проводити збір біогазу, його спалювання, за необхідності, та відбір проб для аналізу. Ферментативний процес проводили в анаеробних мезофільних умовах при перемішуванні за використання, як косубстрату, посліду птахів, інокуляту – анаеробного мулу після зброджування посліду з зерновими культурами. Вміст субстрату за сухою речовиною складав 10%.

Для визначення якісного складу біогазу використовували метод газової хроматографії. Визначення таких показників як рН, ХСК, БСК стічної води та післяспиртової барди проводили хімічними та електрохімічними методами аналізу. Для визначення кількості сухої органічної речовини, зольності застосовували гравіметричний метод. Метод вискоефективної рідинної хроматографії використовували для визначення концентрації ЛЖК. Обробку результатів досліджень та графічне оформлення даних здійснено за допомогою програмного забезпечення MS Excel, АС КОМПАС.

В третьому розділі «Одержання біогазу з післяспиртової барди при її коферментації з пташиним послідом» обґрунтовано технологічні умови одержання біогазу з післяспиртової барди при її коферментації з пташиним послідом.

Для визначення раціонального співвідношення ПСБ : послід було проведено серію дослідів для проб зі співвідношенням ПСБ : послід в діапазоні від 1 : 0,6 до 1 : 3,3. Динаміка виходу біогазу за 30 діб та загальний вихід біогазу за 20 діб ферментації за різного співвідношення компонентів субстрату наведено на рис. 1 і 2, відповідно. Для дослідження процесу анаеробного зброджування барди було обрано 20-денний термін, оскільки, як видно з рис. 1, починаючи з 14-19 доби більша частина проб характеризується припиненням процесу метаногенезу.

Як видно з рис. 1 та 2, раціональним для утворення біогазу є співвідношення компонентів субстрату 1 : 1,7 (проба № 7), що характеризується максимальним виходом біогазу та стабільністю процесу. Вихід біогазу за таких умов становить $265 \pm 17,07 \text{ см}^3/\text{г СОР}$.

Встановлено, що проби зі співвідношенням ПСБ : послід $< 1 : 1,2$ характеризуються низьким виходом біогазу внаслідок закисання середовища та припинення процесу метаногенезу. Це пояснюється збільшенням концентрації органічних кислот під час розкладу жирів, вміст яких вищий у барді.

Визначено, що за рахунок високої концентрації NH_4^+ в пробах зі співвідношенням ПСБ : послід $> 1 : 1,7$ відбувається інгібування метаногенезу

результатом чого є низький вихід біогазу та призупинення діяльності метаногенів.

Показано, що вміст метану у біогазі залежить від вмісту посліду в суміші – чим більше посліду, тим більша концентрація метану. Так, для співвідношення ПСБ : послід 1 : 3,3 концентрація метану становить $71 \pm 2 \%$, для співвідношення ПСБ : послід 1 : 1,7 та 1 : 1,3 вміст метану коливається в межах $(66 - 70) \pm 2 \%$. У випадку співвідношення компонентів післяспиртова барда : послід $\leq 1 : 1,2$ – $(50-55) \pm 1,5 \%$.

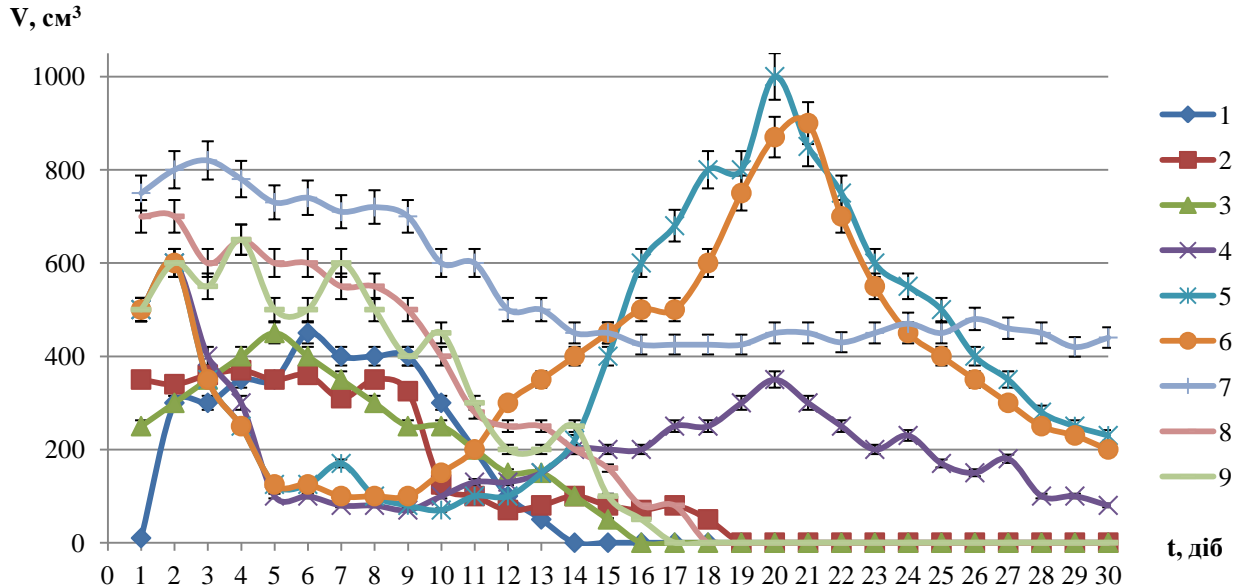


Рис.1. Динаміка виходу біогазу (V) в процесі ферментації (t) за різного співвідношення компонентів субстрату ПСБ : послід:
1 – 1 : 0,6; **2** – 1 : 0,7; **3** – 1 : 1,0; **4** – 1 : 1,1; **5** – 1 : 1,2; **6** – 1 : 1,3; **7** – 1 : 1,7; **8** – 1 : 2,3; **9** – 1 : 3,3

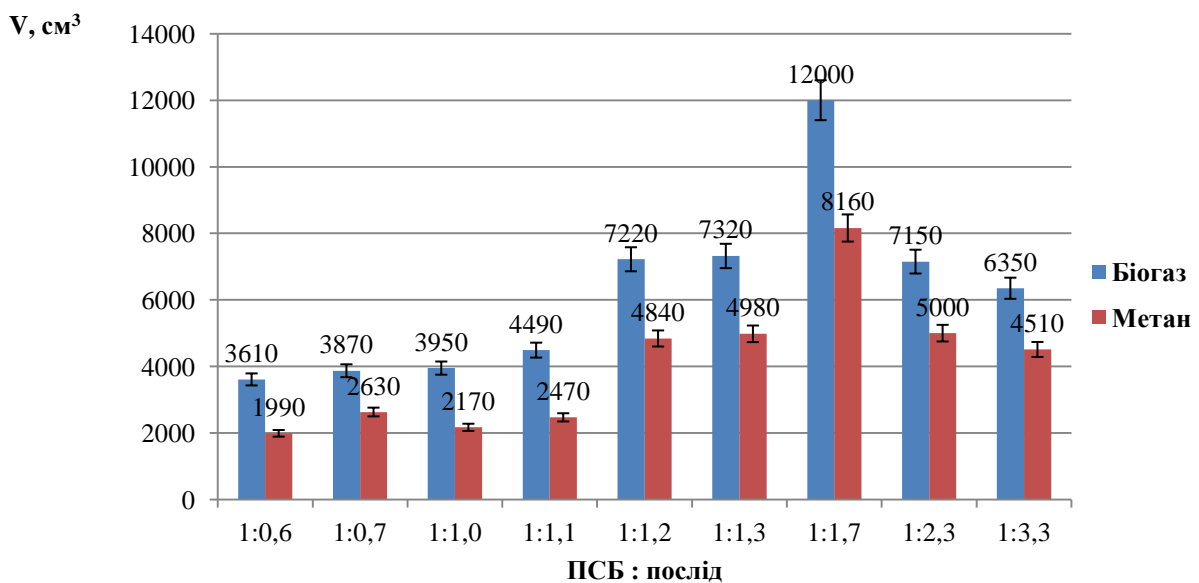


Рис.2. Загальний вихід біогазу та метану (V) за 20 діб ферментації за різного співвідношення компонентів субстрату

В табл. 1 наведено вихід біогазу на г сухої органічної речовини. Найвищий показник – $265 \text{ см}^3/\text{г СОР}$ одержано у випадку співвідношення косубстратів барда : послід 1 : 1,7.

Таблиця 1

Вихід біогазу на г СОР

Співвідношенн я косубстратів	1:0,6	1:0,7	1:1,0	1:1,1	1:1,2	1:1,3	1:1,7	1:2,3	1:3,3
Вихід біогазу, $\text{см}^3/\text{г СОР}$	$96 \pm 3,4$	$84 \pm 4,1$	$56 \pm 1,9$	$99 \pm 3,4$	$165 \pm 5,8$	$166 \pm 8,1$	$265 \pm 13,1$	$94 \pm 2,5$	$184 \pm 6,7$

Дослідження впливу температури (рис. 3) та концентрації інокуляту (рис. 4) на вихід біогазу проводили за використання співвідношення косубстратів ПСБ : послід = 1 : 1,7.

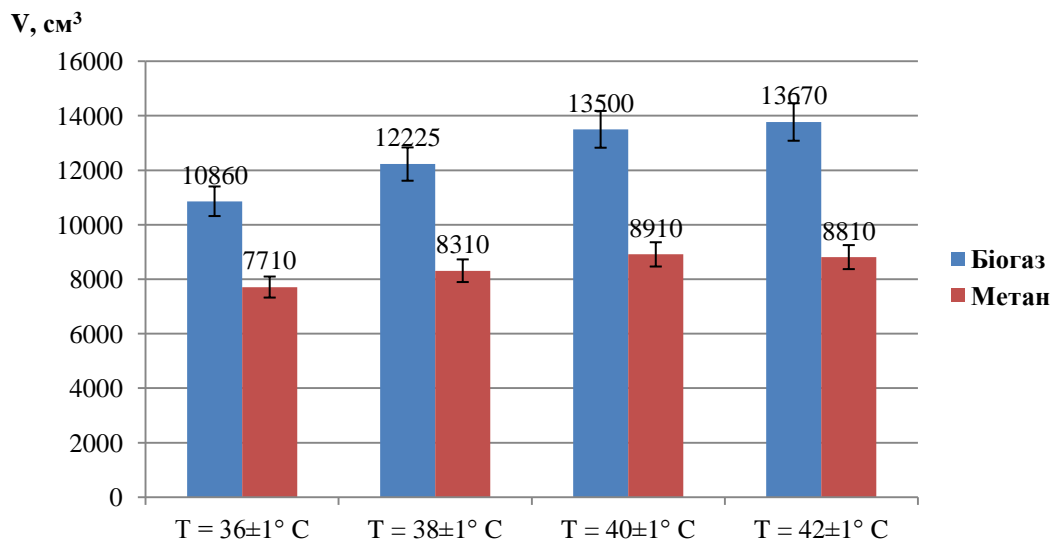


Рис.3. Загальний вихід біогазу та метану (V) за 20 діб ферментації за різної температури процесу при співвідношенні ПСБ : послід 1 : 1,7

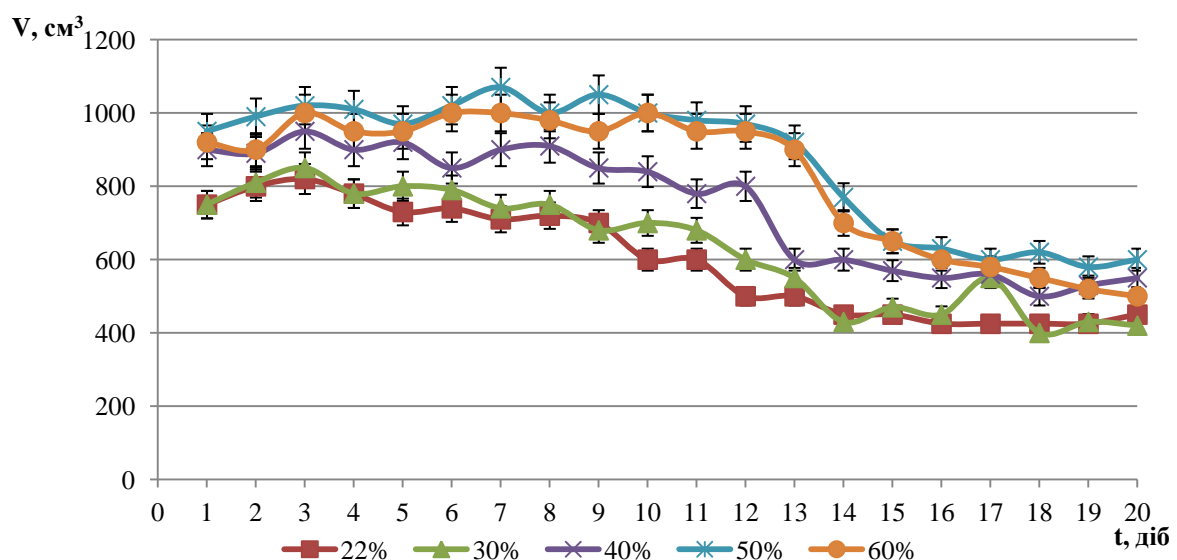


Рис.4. Динаміка виходу біогазу (V) в процесі ферментації (t) за різного вмісту інокуляту в суміші при співвідношенні ПСБ : послід 1 : 1,7.

Визначено, що для запуску процесу утилізації ПСБ при коферментації з послідом для одержання максимального виходу енергоносія (метану) процес

ферментації необхідно проводити за таких параметрів: температура зброджування $40 \pm 1^{\circ} \text{C}$; вміст інокуляту в суміші 50% за СОР.

Для забезпечення неперервної утилізації барди в повному обсязі запропоновано проводити періодичне заміщення частини збродженого субстрату на свіжу барду. Визначено, що для отримання максимального виходу біогазу та вмісту метану в ньому оптимальним об'ємом, який періодично заміщується без зміни параметрів процесу протягом 30 діб, є 1/6 частина середовища при початковому співвідношенні ПСБ/послід 1 : 1,7 (рис.5).

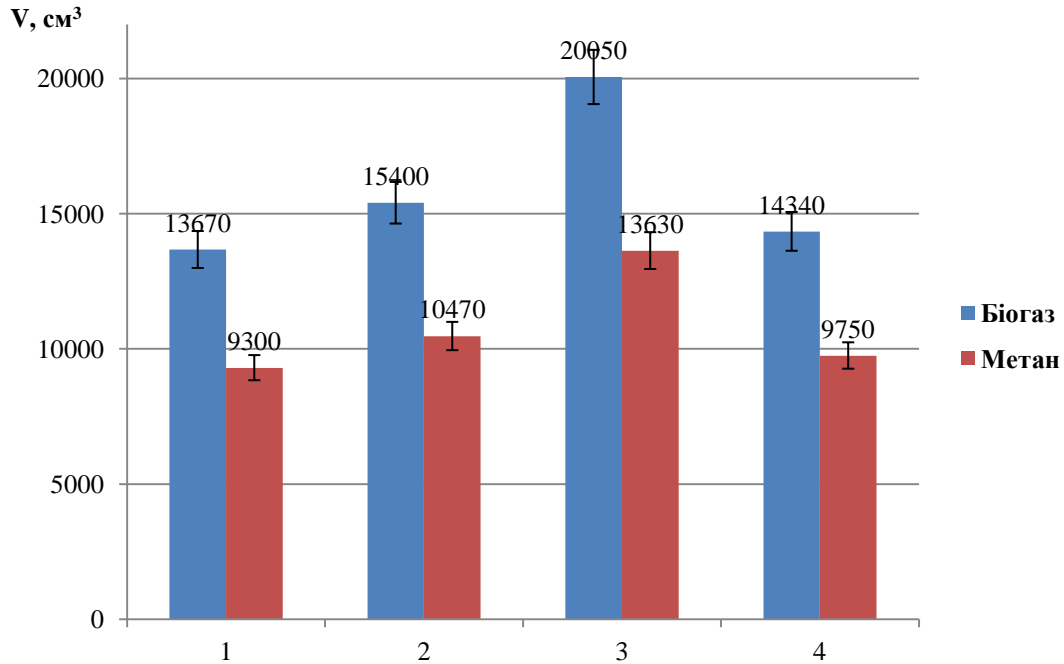


Рис.5. Загальний вихід біогазу та метану (V) за 30 діб ферментації за різних об'ємів заміщення при співвідношенні ПСБ : послід 1 : 1,7:
1 – 1/10 частина робочого об'єму заміщено на свіжу ПСБ; 2 – 1/8; 3 – 1/6; 4 – 1/5.

Четвертий розділ «Математичне моделювання виходу біогазу при заміщенні частини збродженого субстрату» присвячено розробці математичної моделі виходу біогазу при коферментації ПСБ з послідом за умов заміщення частини збродженого субстрату на свіжу ПСБ з низьким значенням рН на основі одержаних експериментальних даних. Аналіз існуючих математичних моделей виходу біогазу [Gerber, M., 2008; Echiegu, E., 2015] показав відсутність математичного опису продукування метану за неперервної зміни співвідношення косубстратів в процесі заміни частини об'єму на один із косубстратів, що призводить до різкої зміни рН середовища.

Теоретично обгрунтовано, що за рахунок власної буферної ємності, що утворюється при перебігу біохімічних процесів, система стає достатньо стійкою до зміни рН. В разі заміщення частини збродженого субстрату на сиру барду у визначених межах система може відновити кислотність середовища до значень, що знаходяться в оптимальних межах для метаногенезу. На рис. 6 наведено динаміку виходу біогазу при заміщенні шостої частини об'єму середовища на сиру барду.

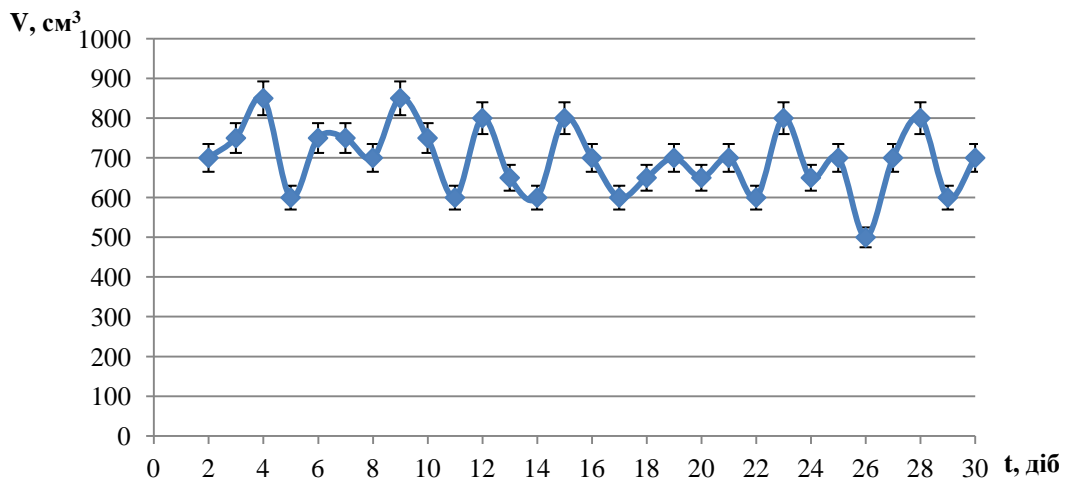


Рис.6. Динаміка виходу біогазу (V) при заміщенні 1/6 частини субстрату на сиру ПСБ

На відміну від періодичного режиму процесу утворення біогазу (рис.4) з рис.6 видно, що в неперервному процесі ферментації при заміні 1/6 частини збродженого субстрату не досягається його виснаження, про що свідчить стабільний вихід біогазу на постійному рівні.

Для з'ясування раціональних параметрів процесу коферментації при заміщенні частини субстрату на ПСБ без додавання посліду досліджено залежності виходу біогазу та зміни рН середовища реактора при заміні 1/6 та 1/8 об'єму (рис.7) та терміну, через який проводиться заміщення частини субстрату (рис.8). На рис.7 наведено зміну рН та виходу біогазу протягом 30 діб зброджування суміші субстратів послід : барда = 1,7 : 1 за СОР при щодобовому заміщенні частини субстрату на сиру ПСБ.

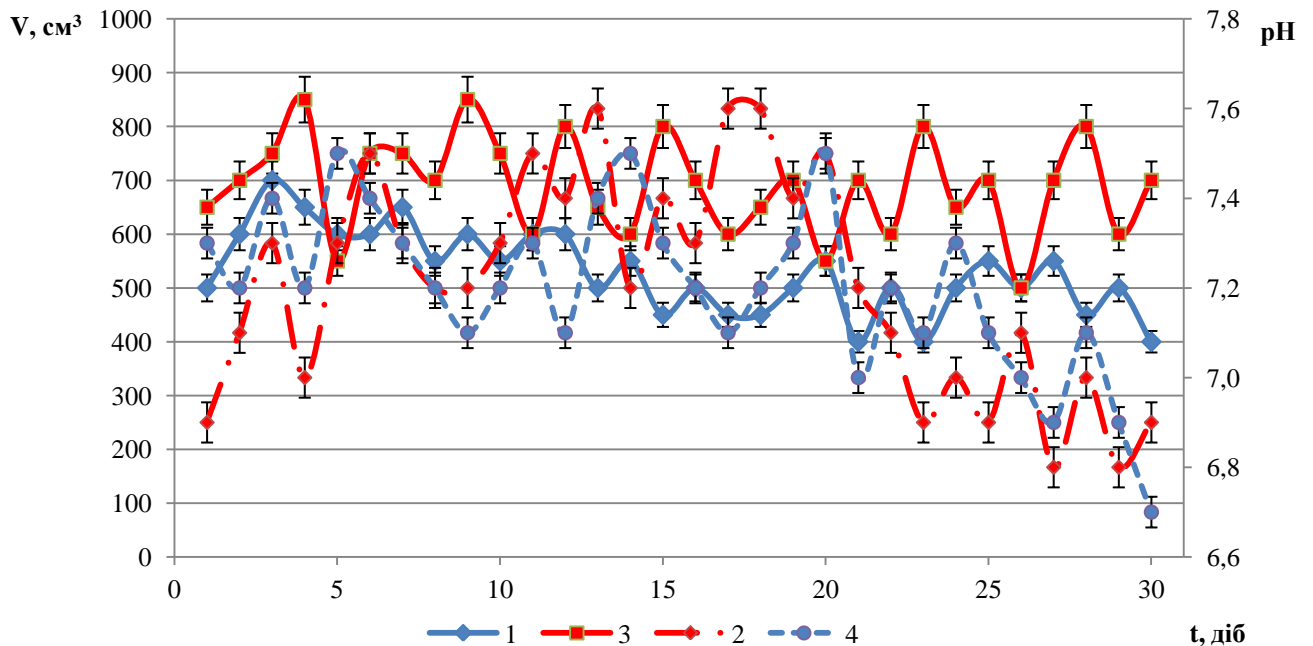


Рис.7. Вихід біогазу (V) (1,3) та зміна значення рН (2,4) за утилізації ПСБ (t) при умові щодобової заміни однієї восьмої (1,4) та однієї шостої (2,3) частини об'єму збродженого розчину на сиру барду

У разі заміни меншого об'єму сировини (1/8) за рахунок менших коливань значення рН в межах, раціональних для метаногенезу, процес

характеризується більш тривалим постійним виходом біогазу. Але в разі заміни одної шостої робочого об'єму реактора на сиру барду одержано на 23% вищий вихід цільового продукту – біогазу за той же період, порівняно з виходом у випадку заміщення 1/8 частини зароджуваної сировини.

Після досягнення значення $pH \leq 6,5$ спостерігається зниження виходу біогазу на 20%, що вказує на зміну метаболізму мікроорганізмів та уповільнення процесу метаногенезу. Тому, за таких умов, для підтримання високої продуктивності процесу переробки ПСБ потрібно проводити перезапуск реактора, тобто додавати послід до досягнення у метантенку співвідношення за сухою органічною речовиною послід/барда 1,7 : 1.

Вихід біогазу протягом 30 діб при різній періодичності заміщення 1/6 частини робочого об'єму реактора наведено на рис.8. При оптимальному кроці заміщення 1 доба вихід біогазу збільшується на 12% по відношенню до частоти заміщення 0,5 доби та на 22% при збільшенні терміну знаходження субстрату в ферментері.

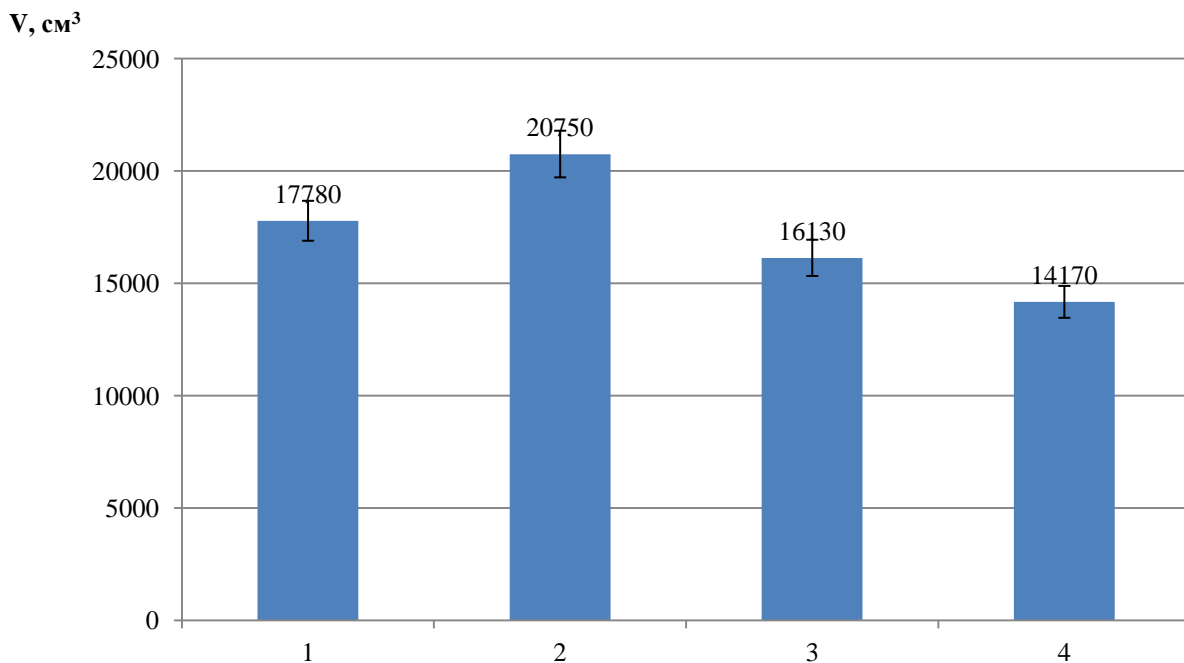


Рис.8. Вихід біогазу (V) за 30 діб зброджування залежно від періодичності заміщення 1/6 субстрату на свіжу ПСБ протягом 30 діб: 1 – 0,5 доби, 2 – 1 доба, 3 – 2 доби, 4 – 3 доби/

Виходячи з експериментальних даних при створенні моделі утилізації ПСБ було враховане наступне: 1) вихід метану залежить від значення pH і має куполоподібну залежність з максимумом в діапазоні pH 6,8 – 7,4; 2) значення pH залежить від початкових значень pH косубстратів та має лінійну залежність від співвідношення косубстратів (послід/ПСБ), тому останнє вибирається таким, що забезпечує вихідне значення pH в оптимальному діапазоні для процесу метаногенезу; 3) стабілізація та підтримка значення pH в раціональних межах метаногенезу відбувається за рахунок саморегуляції системи: гідрокарбонатна буферна система, сполуки з основними властивостями, що утворюються під час розкладу косубстратів, зміна метаболізму мікроорганізмів; 4) у разі зброджування, протягом визначеного часу, різних співвідношень

послід/барда без внесення додаткових порцій посліду, максимальний об'єм заміщення зброженого субстрату на сиру барду не повинний перевищувати 1/6 частину робочого об'єму реактора; 5) зміною кількості інокуляту в процесі ферментації протягом 30 діб можна знехтувати, оскільки приріст анаеробних мікроорганізмів відбувається повільно; 6) режим перемішування близький або відповідає умовам реактора ідеального змішування; 7) процес відбувається за сталої температури та атмосферного тиску.

Для створення математичного опису процесу одержання метану з ПСБ як базова була використана модель Бернарда [Bernard, O., 2001]. Матриця моделі сформована на основі експериментальних даних за умови заміщення частини зброженого субстрату на сиру ПСБ. Перебіг процесу одержання біогазу з ПСБ можна описати системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_1}{dt} = (S_{1in} - \frac{S_{1X1}}{q} - S_1) \cdot D ; \\ \frac{dPOS}{dt} = (POS_{in} - \frac{S_{1X1}}{q} \cdot \frac{POS}{S_1} - POS) \cdot D ; \\ \frac{dPSB}{dt} = (S_{1in} - \frac{S_{1X1}}{q} \cdot \frac{PSB}{S_1} - PSB) \cdot D ; \\ \frac{dZ}{dt} = (Z_{in} - Z) \cdot D = (-\log_{10} \left(\frac{K_a}{K_a + K_b \cdot S_2(0)} \right) - Z) \cdot D ; \\ \frac{dS_2}{dt} = (S_{2in} - S_2 + k_2 \cdot S_{1X1} - k_3 S_{2X2}) \cdot D ; \\ \frac{dC}{dt} = (C_{in} - C + q_c + k_4 S_{1X1} + k_5 S_{2X2}) \cdot D \end{array} \right.$$

де S_1 – загальний вміст органічного субстрату, г/дм³ (органічний субстрат S_1 складається з суми посліду – POS і ПСБ – PSB , тобто $S_1 = POS + PSB$); S_2 – концентрація летких жирних кислот, ммоль/дм³; D – заміщення робочого об'єму реактора, доба⁻¹; q – частина субстрату і біомаси, що відбирається кожену добу; Z – лужність, ммоль/дм³; X_1 і X_2 – концентрації асоціацій ацетогенних та метаногенних мікроорганізмів; C – загальна концентрація неорганічних сполук вуглецю (CO_2 та CH_4), ммоль/дм³; Z_{in} , S_{1in} , S_{2in} , POS_{in} , PSB_{in} , C_{in} – концентрації відповідних величин, які надходять в реактор при заміщенні; q_c – вихід сполук неорганічного вуглецю (CO_2 і CH_4), ммоль/дм³/добу; $K_a = 1,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л – константа рівноваги реакції дисоціації кислот S_2 ; $K_b = 6,5 \cdot 10^{-7}$ моль/дм³ – константа рівноваги реакції $HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow CO_2 + H_2O$.

Вирішення системи даних рівнянь за умови заміщення частини субстрату на 1/6 показує кореляцію з одержаними експериментальними даними (рис.9).

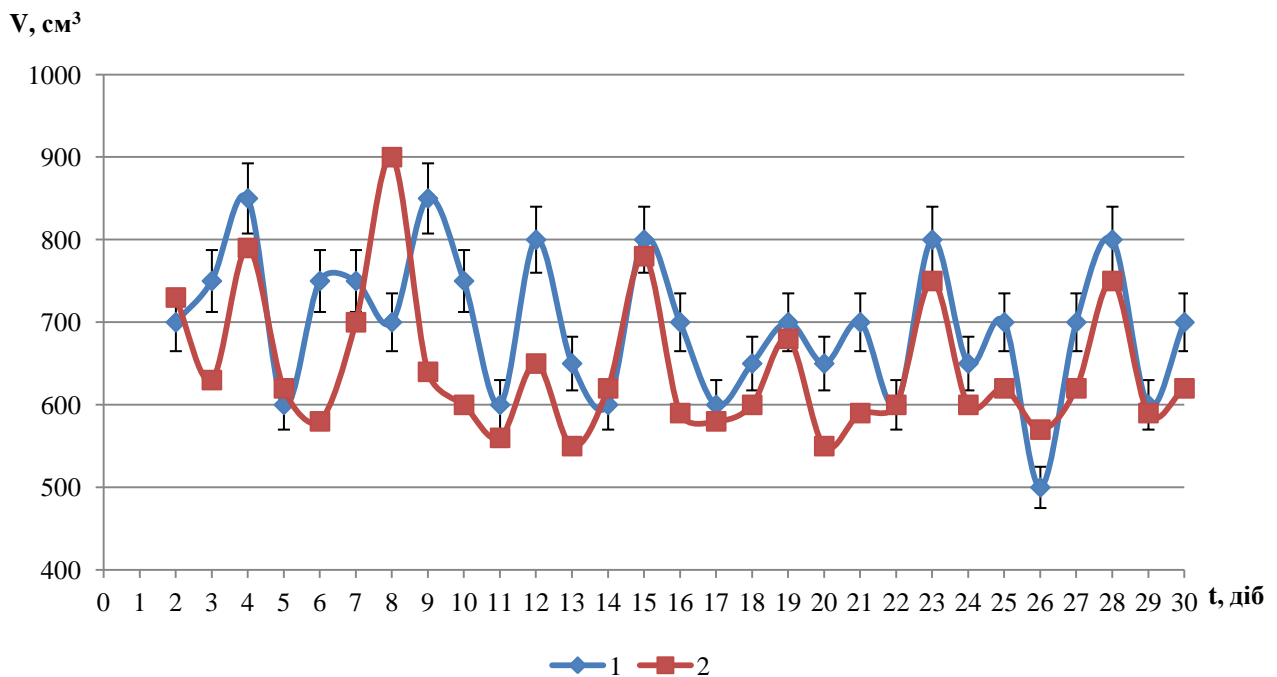


Рис.9. Вихід біогазу (V) в процесі ферментації ПСБ з послідом як косубстратом (t) при заміні 1/6 об'єму ферментера на свіжу барду:
1 – експериментальний вихід біогазу, 2 – теоретичний вихід біогазу.

П'ятий розділ «Одержання біогазу за використання гранульованого анаеробного мулу» присвячено дослідженню процесу утворення гранул за використання різних матеріалів, як центрів грануляції та визначенню ефективності використання гранульованого активного мулу для анаеробного очищення води після першої стадії анаеробного процесу утилізації ПСБ та стічних вод спиртзаводу, в порівнянні з вільно плаваючим анаеробним мулом.

Експериментально досліджено формування гранул на таких центрах грануляції:

- активоване вугілля марки 207ЕА;
- модифіковане іонами кальцію вугілля;
- FeCl_3 ;
- сорбенти на основі сілікагелю та тальку;
- пивна дробина.

Встановлено, що для стічної води, яка містить концентрацію летких жирних кислот в межах $800\text{--}2000\text{ мг/дм}^3$, для утворення гранул анаеробного мулу можливе використання як центрів грануляції сорбентів, в основі яких містяться як донори, так і акцептори протонів. Гранули анаеробної асоціації мікроорганізмів було одержано за використання пивної дробини та сорбенту на основі тальку. Використання пивної дробини як центрів грануляції дозволяє сформувати гранули за рахунок росту біоплівки як на поверхні гранули, так і в середині, за рахунок її поживних речовин. Це призводить до утворення більш стійких гранул до агресивного середовища.

Оскільки, поверхня частинки сорбенту на основі тальку, окрім розвинутої поверхні (пор), містить атоми кисню та магнію, це створює можливість для

осадження як заряджених, так і незаряджених речовин та мікроорганізмів, що містяться в ПСБ.

Визначено, що за використання гранульованого активного мулу в процесі очищення води на другій стадії переробки ПСБ, порівняно з вільноплаваючим, спостерігається вищий на $23 \pm 2\%$ вихід біогазу. При цьому також збільшується на $8 \pm 1\%$ вміст метану в біогазі (рис. 10).

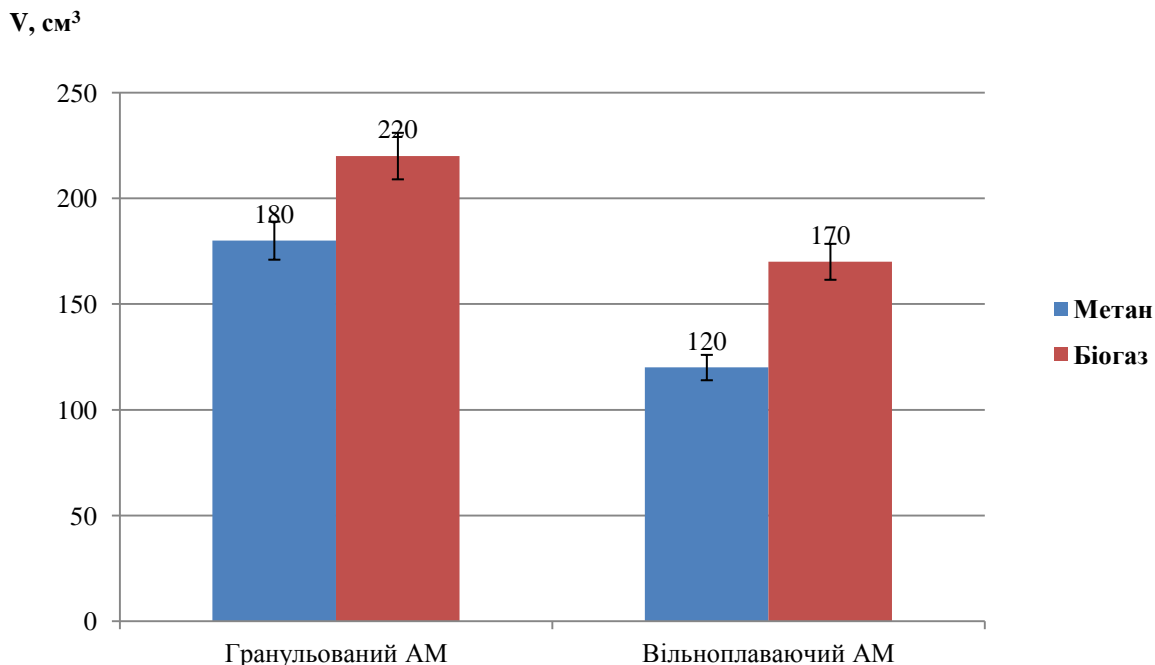


Рис. 10. Вихід біогазу та метану (V) за добу за використання вільноплаваючого та гранульованого анаеробного мулу.

Ефективність очищення стічної води за використання гранульованого активного мулу вища на 12% в порівнянні з вільноплаваючим. Ступінь зниження ХСК за таких умов досягає 84% при початковому значенні $2800 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$.

У шостому розділі «Технологічний процес одержання біогазу з відходів спиртового виробництва» запропоновано технологічну та апаратурну схеми технології одержання біогазу в процесі переробки ПСБ. Фрагмент технологічної схеми наведено на рис. 11. Для інтенсифікації процесу утилізації ПСБ, збільшення виходу біогазу та відсотку утилізації компонентів сировини пропонується проводити двостадійний анаеробний процес. На першій стадії ферментації проводиться нейтралізація ПСБ за рахунок введення посліду. Оскільки в процесі деструкції сполук, що містяться в посліді, утворюються речовини, що дають лужну реакцію, і деструкція компонентів посліду є тривалим процесом, то порція посліду, що завантажується для початкової нейтралізації, може бути використана тривалий термін. На першій стадії відбувається постійне заміщення визначеної частини збродженого розчину на сиру барду без зміщення значення рН за межі раціонального інтервалу для метаногенезу. При постійному заміщенні частини суспензії концентрація поживних речовин в першому реакторі залишається постійною. Це дає змогу забезпечити сталий вихід біогазу. При цьому концентрація метану в біогазі в

процесі циклу ферментації до нового перезавантаження змінюється від $70\pm 2\%$ до $65\pm 2\%$ за рахунок зниження вмісту компонентів посліду у середовищі.

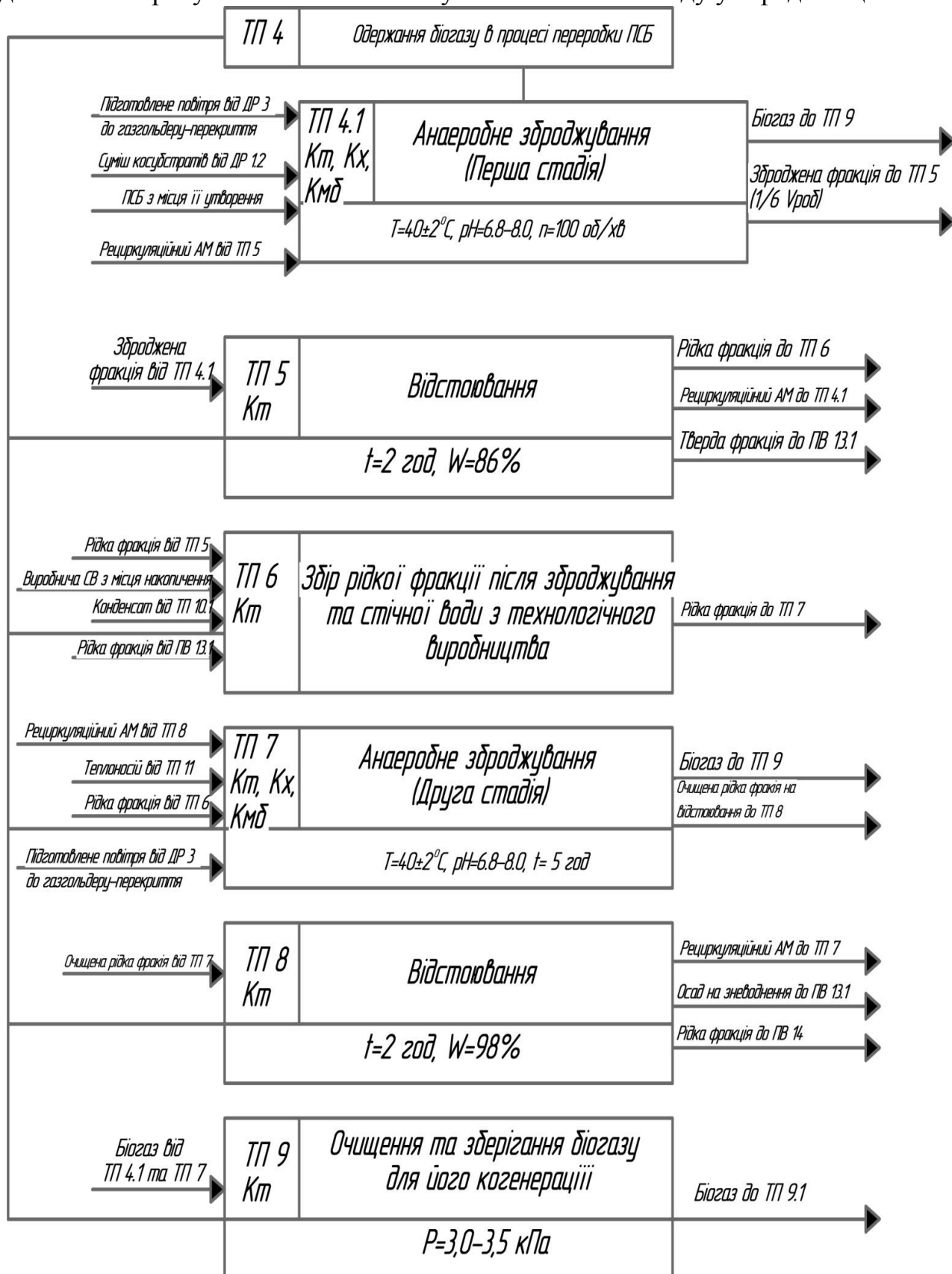


Рис. 11. Фрагмент технологічної схеми одержання біогазу в процесі анаеробного зброджування ПСБ та посліду птахів

Частина рідкої фракції, що постійно відбирається з першого метантенка, після відокремлення твердої фракції, надходить до другого реактора, де відбувається її очищення до значень за ХСК, які використовуються в системі аеробного доочищення. Оскільки рідка фракція після першого метантенка має достатньо високі показники за СОР, то одночасно з її очищенням у другому анаеробному ферментері відбувається одержання біогазу. Таким чином, запропоноване технологічне рішення дозволяє вирішити проблему очищення рідкої фракції після зброджування ПСБ у першому реакторі та стічної води спиртзаводу з одночасним одержанням біогазу. Двостадійний процес коферментації з послідом дозволяє: стабілізувати значення рН в реакторах; інтенсифікувати процес очищення концентрованої, за органічними речовинами, рідкої фракції після зброджування; підвищити вихід біогазу та вміст метану в ньому; збільшити ступінь перетворення органічних речовин ПСБ, одержати органічне добриво.

Досліджено вплив добрива, яке було одержане в процесі анаеробного зброджування, на сільськогосподарські рослини. Для цього використовували томати сорту «Балконне диво» *Solanum lycopersicum*. Визначено, що за використання добрива урожай зростає на 15-24%, рослини характеризуються міцним м'ясистим стеблом та насиченим зеленим кольором листя. Оптимальною дозою внесення добрива є 15% за вагою ґрунту.

Розрахована собівартість м³ біогазу, одержаного за запропонованою технологією, без урахування вартості добрива складає 5,15 грн.

У додатках наведено акт впровадження технологічних рішень у проектну документацію технології переробки ПСБ з одержанням біогазу, акт використання одержаних результатів у навчальному процесі, техніко-економічний розрахунок собівартості біогазу.

ВИСНОВКИ

Одержані результати дозволяють вирішити важливу проблему утилізації післяспиртової зернової барди з одночасним одержанням біогазу та добрива, що дозволяє підвищити рентабельність процесу та знизити негативний вплив на оточуюче середовище.

1. Для проведення процесу зброджування післяспиртової барди запропоновано використання посліду як косубстрату, що дозволяє встановити значення рН та співвідношення С : N, характерних для процесу метаногенезу. Визначено раціональне співвідношення косубстратів за СОР післяспиртова барда/послід для процесу ферментації барди 1 : 1,7. За таких умов вихід біогазу складає $265 \pm 17,1$ см³/г СОР з вмістом метану $70 \pm 2\%$. При зниженні вмісту посліду за СОР менше ніж 1 : 1 відбувається закиснення середовища. Підвищення вмісту посліду по відношенню до післяспиртової барди 1 : 2,3 і вище призводить до зниження виходу біогазу внаслідок інгібування процесу іонами амонію.

2. Встановлено раціональне співвідношення за СОР інокуляту до субстрату 1 : 1, що дає можливість інтенсифікації процесу переробки сировини з високим виходом біогазу та ступенем розкладу органічної речовини в анаеробному процесі.

3. Експериментально визначено можливі центри грануляції анаеробного мулу (пивна дробина, сорбент на основі тальку) при очищенні води, що утворюється на першій стадії процесу утилізації ПСБ. Показано, що за використання гранульованого анаеробного мулу по відношенню до вільноплаваючого підвищується ефективність зниження ХСК на $12\pm 1\%$, вихід біогазу на $22\pm 2\%$, вміст метану на $8\pm 1\%$.

4. Розроблено математичну модель продукування біогазу залежно від значення рН та об'єму заміщуваної частини субстрату на сиру ПСБ, яка є підґрунтям для створення системи управління процесом ферментації післяспиртової барди в залежності від змінних параметрів процесу.

5. Обґрунтовано та розроблено технологічну та апаратурну схеми технології конверсії відходів спиртового виробництва в енергоносії, яка дозволяє утилізацію зернової післяспиртової барди в повному обсязі, підвищити вихід біогазу та метану в ньому, одержати органічне добриво, та виключає використання хімічних речовин для регуляції рН і введення додаткових джерел живлення. Одержані наукові результати та розроблена технологія переробки ПСБ впроваджено у проектну документацію ТОВ «Про-Енерджі» та у навчальному процесі спеціальності 162 – біотехнології та біоінженерія, що підтверджено актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голуб, Н. Б.; Щурская, Е. А.; Троценко, М. В. (Потапова, М. В.) Анаэробная очистка сточных вод пивоваренных заводов с одновременным получением водорода. *Химия и технология воды* **2014**, 2, с 163–176. (Особистий внесок – брала участь в експериментальних дослідженнях та підготовці статті. Журнал входить до наукометричної бази SCOPUS).

2. Голуб, Н. Б.; Козловець, О. А.; Шинкарчук, М. В.; Потапова, М. В. Комплексна технологія очищення стічних вод птахофабрик та фільтрату після їх анаеробного зброджування. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки* **2016**, 27, с 70–77. (Особистий внесок – брала участь у проведенні експериментальних досліджень, обробці результатів та підготовці статті).

3. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика* **2017**, 49 (2), с 90–97. (Особистий внесок – брала участь в плануванні експерименту, узагальненні результатів та підготовці статті).

4. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Технологія одержання біогазу з післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика* **2018**, 53 (2), с 70–77. (Особистий внесок – брала участь у проведенні експериментальних досліджень, обробці результатів та підготовці статті).

5. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В.; Шинкарчук, М. В.; Козловець, О. А. Получение биогаза при очистке концентрированных сточных вод спиртзавода. *Альтернативная энергетика и экология* **2018**, 25-30, с 51–59. (Особистий внесок – брала участь в плануванні експерименту, узагальненні результатів та підготовці статті. Іноземне видання).

6. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Сучасні методи переробки та утилізації зернової післяспиртової барди. *Innov Biosyst Bioeng* **2018**, 2 (2), с 125–

134. (Особистий внесок – брала участь в літературному огляді та підготовці статті. Журнал входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus тощо).

7. Golub, N. B.; Potapova, M. V. Technological solution of biogas output increasing at grain distillery spent wash fermentation. *Innov. Biosyst. Bioeng.* **2018**, 3 (2), pp 144–148. (Особистий внесок – брала участь в плануванні експерименту, узагальненні результатів та підготовці статті. Журнал входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus тощо).

8. Голуб, Н. Б.; Щурська, К. О.; Троценко, М. В. (Потапова, М. В.) Одержання водню за використання відходів пивоварних заводів. *Новини енергетики* **2013**, 2, с 24–33. (Особистий внесок – брала участь у проведенні експериментальних досліджень, обробці результатів та підготовці статті).

9. Троценко, М. В. (Потапова, М. В.) Грануляція активного мулу в UASB-реакторі. *Екологія. Людина. Суспільство*, Тези Доповідей XIV Міжнародної Науково-практичної Конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, Україна, Травень 18-22, 2011; НТУУ «КПІ» : Київ, 2011; с 102–103. (Особистий внесок – підготовка тез).

10. Голуб, Н. Б.; Троценко, М. В. (Потапова, М. В.); Колеснік, К. В. Грануляція активного мулу в очисних спорудах заводів з виробництва пива. *ЕТЕВК-2011*, Тези Доповідей Міжнародного Конгресу, Ялта, Україна, Крим, Червень 6-10, 2011; Сімферополь, 2011; с 302–305. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

11. Троценко, М. В. (Потапова, М. В.) Грануляція активного мулу. *Біотехнологія XXI століття*. Тези Доповідей V Регіональної Науково-практичної Конференції викладачів, науковців, аспірантів, молодих вчених та студентів, Київ, Україна, Листопад 25, 2011; НТУУ «КПІ» : Київ, 2011; с 93. (Особистий внесок – підготовка тез).

12. Колесник, К. В.; Троценко, М. В. (Потапова, М. В.) Грануляція активного мулу в анаеробних умовах. *Екологія. Людина. Суспільство*, Тези Доповідей XV Міжнародної Науково-практичної Конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, Україна, Вересень 26-30, 2011; НТУУ «КПІ» : Київ, 2012; с 44–45. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

13. Голуб, Н. Б., Троценко, М. В. (Потапова, М. В.); Лелеко, І. Г. Одержання біогазу за використання відходів виробництв. *Відновлювана енергетика XXI століття*, Тези Доповідей 12 Міжнародної Конференції, смт. Миколаївка, Крим, Україна, Вересень 10-14; Вікторія : Київ, 2012; с 601. (Особистий внесок – брала участь в підготовці тез).

14. Потапова, М. В.; Козловець, О. А. Одержання біогазу з пташиного посліду та відходів спиртового виробництва. *Біотехнологія XXI століття*, Тези Доповідей IX Всеукраїнської Науково-практичної Конференції, Квітень 24, 2015; НТУУ «КПІ» : Київ, 2015; с 160–161. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

15. Потапова, М. В.; Голуб Н. Б. Анаеробне зброджування пташиного посліду та барди з одержанням енергоносія – біогазу. *Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті*, Тези Доповідей XVI Міжнародної Науково-практичної Конференції, Травень 28-29, 2015, Київ,

Україна; Едельвейс : Київ, 2015; с 364. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

16. Потапова, М. В.; Голуб, Н. Б. Отримання альтернативних джерел енергії з відходів спиртового виробництва. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*, Тези Доповідей Дев'ятої Міжнародної Науково-практичної Конференції, Квітень 6-7, 2017, Львів, Україна; НУ «Львівська політехніка» : Львів, 2017; с 151–154. (Особистий внесок – брала участь в підготовці тез).

17. Потапова, М. В.; Голуб, Н. Б. Анаеробна коферментація післяспиртової барди та пташиного посліду. *Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті*, Тези Доповідей XVIII Міжнародної Науково-практичної Конференції, Вересень 27-29, 2017, Київ, Україна; Календар : Київ, 2017; с 726–729. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

18. Потапова, М. В.; Голуб, Н. Б. Анаеробне зброджування висококонцентрованих стічних вод спиртзаводу з отриманням біогазу. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти*, Тези Доповідей V Міжнародної Науково-практичної Конференції, Жовтень 26-27, 2017, Київ, Україна; НТУУ «КПІ» : Київ, 2017; с 181–182. (Особистий внесок – брала участь в підготовці тез).

19. Потапова, М. В.; Голуб, Н. Б. Технологія одержання біогазу із зернової післяспиртової барди. *Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання)*, Тези Доповідей Сімнадцятої Міжнародної Науково-практичної Конференції, Травень 24-25, 2018, Львів, Україна; НУ «Львівська політехніка» : Львів; с 291–294. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

20. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Одержання біогазу з відходів спиртового виробництва. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)*, Тези Доповідей VII Міжнародної Науково-технічної Конференції, Травень 23-27, 2018, Київ, Україна; НУБіП : Київ, 2018; с 32–33. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

21. Голуб, Н. Б.; Потапова, М. В. Підвищення виходу біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті*, Тези Доповідей XIX Міжнародної Науково-практичної Конференції, Вересень 26-28, 2018, Київ, Україна; Календар : Київ, 2018; с 726–729. (Особистий внесок – брала участь в проведенні експерименту та підготовці тез).

АНОТАЦІЯ

Потапова М.В. Технологія одержання біогазу при утилізації післяспиртової зернової барди. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019. Дисертація присвячена науково-технічним основам технології переробки

післяспиртової зернової барди з отриманням біогазу. Визначено залежність виходу біогазу від співвідношення компонентів субстрату, а саме ПСБ та посліду, що дозволяє підвищити вихід цільового продукту – біогазу та вміст метану в ньому. В роботі розглянуто основні параметри процесу метаногенезу. Експериментально визначено оптимальну температуру та вміст інокуляту в суміші за яких спостерігається максимальний вихід біогазу з даної сировини. Оскільки технологія передбачає напівперервний процес переробки барди, що забезпечується постійним заміщенням частини збродженої суміші на свіжу післяспиртову барду, було визначено частоту даних заміщень та об'єм субстрату, який заміщується

Показано вплив гранульованого анаеробного активного мулу на процес очищення рідкої фракції збродженої суміші субстратів: ПСБ, посліду та СВ на вихід біогазу на даній стадії. Запропоновано математичну модель залежності виходу біогазу від значення рН та об'єму заміщення частини субстрату на сиру ПСБ, що дає можливість створення системи управління процесом ферментації післяспиртової барди в заданих умовах без зміни параметрів процесу. Визначено технологічні режими двостадійної анаеробної переробки висококонцентрованої стічної води спиртзаводу в повному обсязі.

Ключові слова: біогаз, післяспиртова барда, метантенк, анаеробне зброджування, коферментація, послід, грануляція.

SUMMARY

Potapova M. V. Biogas production technology at grain distillery spent wash fermentation. "As a manuscript."

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 03.00.20 – biotechnology. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Kiev, 2019.

The thesis is devoted to the scientific and technical fundamentals of technology for grain distillery spent wash processing with biogas production. The dependence of the biogas output on the ratio of the substrate components, namely DSW and poultry manure, has been determined, which allows to increase the yield of the target product - biogas and the methane content in it. The main parameters of the methanogenesis process are considered in this paper. The optimum temperature and inoculum content in the mixture, in which the maximum biogas output from this raw material is observed, is experimentally determined. As the technology involves a semi-continuous process of distillery spent wash processing, which is ensured by the constant replacement of the part of the fermented mixture with a fresh distillery spent wash, the frequency of substitution data and the amount of substrate replaced is determined.

The effect of the granular anaerobic active sludge on the treatment process the liquid fraction of the digested substrate mix: DSW, poultry manure and wastewater for biogas output on this stage was demonstrated. The mathematical model of the biogas output dependence on the pH value and the substitution volume of a substrate part on the raw DSW is proposed, which makes it possible to create a system for controlling the process of distillery spent wash fermentation in the given conditions

without changing the process parameters. The technological regimes of the two-stage anaerobic processing of highly concentrated distillery wastewater in full are determined.

Key words: biogas, distillery spent wash, methane tank, anaerobic digestion, cofermentation, poultry manure, granulation.

АННОТАЦИЯ

Потапова М. В. Технология получения биогаза при утилизации послеспиртовой зерновой барды. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 – биотехнология. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2019.

Диссертация посвящена научно-техническим основам технологии переработки послеспиртовой зерновой барды с получением биогаза.

С развитием спиртовой промышленности, возникла проблема утилизации отходов. Наиболее остро стоит проблема утилизации основного отхода производства – послеспиртовой барды, объем которой в 10-15 раз превышает количество полученного спирта. В натуральном виде барда не пользуется спросом на рынке, поскольку она не подлежит длительному хранению. За счет высоких показателей химического и биохимического потребления кислорода, низкого значения рН, специфического цвета и запаха, высокого содержания взвешенных веществ, очистка таких отходов на полях фильтрации или сброс ее в водоемы невозможен.

В настоящее время исследуются методы анаэробной переработки послеспиртовой барды с получением биогаза. Основной проблемой анаэробного сбраживания барды является низкое значение рН, и дефицит основных элементов питания, что ингибирует процесс метаногенеза. Поэтому исследования в направлении стабилизации рН и технологии проведения процесса ферментации является актуальной задачей переработки барды. В работе для решения данных проблем предлагается использование птичьего помета в качестве косубстрата при ферментации барды.

В исследовании определено зависимость выхода биогаза от соотношения компонентов субстрата, а именно ПСБ и помета, что позволяет повысить выход целевого продукта – биогаза и содержание метана в нем. Рациональным соотношением компонентов субстрата по сухому органическому веществу послеспиртовая барда/помет для процесса ферментации барды является 1: 1,7. При таких условиях выход биогаза составляет $265 \pm 17,1$ см³/г СОР с содержанием метана $70 \pm 2\%$. В случае снижения содержания помета по СОР менее 1 : 1 происходит закисления среды за счёт накопления органических кислот. Повышение содержания помета по отношению к послеспиртовой барды 1 : 2,3 и выше приводит к снижению выхода биогаза вследствие ингибирования процесса ионами аммония, которые присутствуют в помете и образуются в процессе гидролиза мочевины и разложения белков.

Для интенсификации процесса анаэробной очистки сегодня используют методы повышения концентрации ила, а именно – инертные носители для

иммобилизации микроорганизмов, или грануляцию. За счет высокой концентрации анаэробных микроорганизмов в гранулах, по сравнению с количеством микроорганизмов в свободно плавающем активном иле, процесс метаногенеза проходит более интенсивно с высоким выходом биогаза и снижением ХПК.

В работе показано влияние гранулированного анаэробного активного ила на процесс очистки жидкой фракции сброженной смеси субстратов: ПСБ, помета и СВ на выход биогаза на данной стадии. Определено, что при использовании гранулированного анаэробного ила по отношению к свободно плавающему, повышается эффективность снижения ХПК на $12 \pm 1\%$, выход биогаза на $22 \pm 2\%$, содержание метана на $8 \pm 1\%$.

Экспериментально определены возможные центры грануляции анаэробного ила (пивная дробина, сорбент на основе талька) при очистке воды, образующийся на первой стадии процесса утилизации ПСБ.

Разработка математической модели получения метана методом анаэробного сбраживания послеспиртовой барды, при ее коферментации в условиях переменного значения показателя pH, является актуальной задачей. Поскольку существующие модели, в основном, не рассматривают влияние на выход метана замещения части сброженного субстрата на свежий с низким значением pH, не рассматривают механизм выработки метана в изменяющихся условиях среды, что является результатом не постоянного соотношения косубстратов.

В работе предложена математическая модель зависимости выхода биогаза от значения pH и объема замещения части субстрата на сырую ПСБ, что дает возможность создания системы управления процессом ферментации послеспиртовой барды в заданных условиях без изменения параметров процесса. Полученные теоретические результаты коррелируют с экспериментальными данными.

Определены технологические режимы двухстадийной анаэробной переработки сточной воды спиртзавода в полном объеме, которые дадут возможность повысить выход биогаза и метана в нем, получить органическое удобрение, и исключат использование химических веществ для регуляции pH и введение дополнительных источников питания.

Ключевые слова: биогаз, послеспиртовая барда, метантенк, анаэробное сбраживание, коферментация, помет, грануляция.